

ダイバーシティコーディングによる パス故障復旧方式の性能評価

北見 徳廣

Performance Evaluation of Path Failure Restoration Method based on Diversity Coding

Tokuhiro KITAMI

Department of Electronics and Communications

School of Science and Technology, Meiji University

1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa-ken, 214-8571

Received September 8, 2000; Accepted February 26, 2001

Synopsis: This paper deals with a path failure restoration method, which is called Diversity Coding system, for efficient failure recovery in virtual path based networks. Diversity Coding system uses error correcting codes constructed across logically independent virtual paths. The technique enables a fast recovery, since it can reconstruct failed path data through data processing between receive nodes and it does not need rerouting. The author proposed a segment network formation principle for reducing spare path capacity in Diversity Coding system, and presented a hybrid network structure using both Diversity Coding and switchover type Self Healing. This paper also presented a procedure for restoration message transfer. Performance evaluation by simulation showed that the proposed system had the capability to reduce failure restoration delay with a little increase in spare capacity ratio.

Keywords: path failure, failure restoration, self healing, operation and maintenance, spare path

1. まえがき

パス故障の迅速な復旧は通信網の高信頼化・高安定化のための重要な課題の一つである。ATM (Asynchronous Transfer Mode) 網などの高速・広帯域通信網においては、バーチャルパス (VP: Virtual Path) を網の管理・運用のベースとしており、パス故障の復旧に関してもバーチャルパスの概念に基づいた復旧処理が行われる。バーチャルパスは、その経路の設定と容量の確保とを分離して行うことができるという特長をもっている。従って、パス故障が発生していない平常時には各パスごとの復旧用の容量が確保されていることは必ずしも必要ではなく (復旧用の経路のみを設定しておくことは可能)、復旧用の容量は故障発生後の復旧処理の一環として確保されるという扱いも可能である。各パスごとの復旧用の経路については、故障発生後に経路探索を行って設定する方法もあり、また平常時からあらかじめ設定しておく方法もある。

バーチャルパスのこのような特長を生かしたパス故障の

復旧方式としては、分散制御技術を用いて復旧用の切替経路を自律的に探索する Self Healing (SH) 方式[1]がある。SH 方式のなかでも、切替パス事前設定型方式[2]は切替パスをあらかじめ設定しておくので、切替パスの経路探索処理の簡易化ならびに容量確保時間の低減を図ることができる。一方、故障発生時における故障復旧パスの探索および確保を原理的に不要とし、故障復旧処理の簡易化ならびに復旧処理時間の一層の低減を図るため、複数のパス間にまたがる誤り訂正符号化を適用して、受信側のみの処理で故障パスのデータを復元する Diversity Coding (DC) 方式が提案されている[3]-[7]。

DC 方式の適用にあたっては、故障復旧用の予備パス総量の増加を避けるため、送信ノード相互間距離および受信ノード相互間距離が、送受信ノード間距離に比べて短いことが必要であるなどの点で、網内の送受信ノードの配置に制約がある[3]-[4]。この制約を緩和するためには、網全体の常用パス群を DC 方式に適する複数個の部分網に分

割する構成が有効である[5]–[8]。

本論文では、まず DC 方式の基本構成、部分網の構成法、DC 方式における故障復旧処理について述べる。また、DC 方式と SH 方式の各々の特長を生かして共存させる混在網 (HY : Hybrid) を提案するとともに、DC 網および HY 網に関する故障復旧性能を評価する[10]。

2. DC 方式の基本構成

2.1 方式の基本的特徴

DC 方式は、図 1 に示すように複数の送受信ノード間で情報転送を行う網において、これらの複数のパス間にまたがる誤り訂正符号化を適用する。パス故障の際には該当する受信ノードでパス故障を検出し、非故障常用パス（故障していない常用パス）のデータとパリティパスのデータを用いて、デコーダノードにおいて故障パスのデータを復元し、故障復旧を行う[3]–[4]。故障回復のための処理は受信ノード間のみで行われ、送受信ノード間での処理メッセージの転送は必要ないので故障復旧時間が短縮される[3]–[4]。

2.2. 適用符号

DC 方式においては、故障パスデータの復元のため複数の常用パスの間にまたがる誤り訂正符号化を用いる。この符号化の際に、常用パス（複数）のデータは適用符号の情報シンボルとして扱われ、パリティパスのデータは適用符号の検査シンボルとして扱われる。すなわち、適用符号は組織符号であり、さらに符号化・復号化処理の容易な線形ブロック符号とする。

故障パス (FP : Failed Path) のデータ復元には適用符号の訂正能力を最大限に活用するため消失訂正を用いる。すなわち、故障パス (FP) のデータを消失として扱い、これに対応する受信データの部分を “all 0” に置換してから復号処理を行って、故障パスのデータを復元する。

パス容量の設定にあたっては、基準となる容量（以下では、基準容量と呼ぶ） C_0 を定め、全てのパスの容量は基準容量 C_0 の整数倍に設定するものとする。この基準容量 C_0 は、符号化・復号化の際の処理の単位としても用いることとする。すなわち、基準容量 C_0 のデータを適用符号の 1 シンボルに対応させる。

網内の各リンクへの収容パス容量の最大値を $N \cdot C_0$ / リンク (N : 整数) とし、1 重リンク故障（1 つのリンクが全断となる故障）の復旧を前提とする。リンク故障時に復元すべきパスの容量は最大で $N \cdot C_0$ であり、基準容量 C_0 の N 倍となる。この結果、復元すべきシンボル数は最大で N シンボルとなるので、最小距離が $(N+1)$ シンボルの最大距離分離符号を用いれば、消失訂正により故障パスのデータを完全に復元できる。従って、検査シンボル数が N の Reed-Solomon 符号を用いる。但し、必要に応じて符号の短縮化またはパंकチャド符号化

(Punctured Coding) を行って、情報シンボル数と検査シンボル数を所要の値に設定する。

送信側における符号化の際には、各パス（各々の常用パスおよびパリティパス）は、予め定められた一定の時間ごとに、その時間内に含まれるデータをブロック化して符号化マトリクスを構成する[4]。符号化マトリクスの横方向のデータは各パスごとの時間軸方向に対応し、符号化マトリクスの縦方向のデータはパス間にまたがる空間軸方向に対応する。前記した故障パスデータ復元用の適用符号は、この符号化マトリクスの縦方向に適用される。符号化マトリクスには、作成された順に番号（符号化マトリクス番号）を付与する。この符号化マトリクス番号は、各パスごとに符号化マトリクスの境界位置に挿入される制御情報チャネルにより受信側に転送される。受信側における復号化の際には、制御情報チャネルにより転送された符号化マトリクス番号を参照して、各パスごとに同一の符号化マトリクス番号のデータを対応させる。このようにして、送信側と受信側の符号化データの対応を確定する。

2.3 コーデックの設置形態

図 1 のように複数の送信ノードと複数の受信ノードからなる網において、送受信ノードのうちの各 1 ノードずつを、それぞれ Main Coder Node (MCN)、Main Decoder Node (MDN) とする。他の送受信ノードは、Sub Coder Node (SCN)、Sub Decoder Node (SDN) と呼ぶ。コーデック (Codec) の設置形態には、集中型 (図 1 (a)) と分散型 (図 1 (b)) とがある。ノード間でのパリティパス関連の転送データの概要を表 1 に示す。

2.3.1 集中型

集中型では、MCN および MDN のみにおいて集中的に符号化および復号化を行う。SCN および SDN は、MCN および MDN との間で直接に送信データ (Transmit Data)、受信データ (Receive Data) および復元データ (Recovered Data) の転送を行う。

MCN では、SCN→MCN 方向のサブパリティパスを通して各 SCN から転送されてきた Transmit Data と、MCN において新たに発生する Transmit Data を用いてパリティデータ (Parity Data) を作成し、メインパリティパスを通して MDN に転送する。MDN では、MCN から転送されてきた Parity Data と、各 SDN から転送されてきた Receive Data および MDN に直接に受信される Receive Data を用いてシンドロームデータ (Syndrome Data) を作成し、次にその Syndrome Data に基づいて故障パスのデータを復元する。復元された Recovered Data は、MDN→SDN 方向のサブパリティパスを通してパス故障を検出したノードに転送される。

2.3.2 分散型

分散型では、各々の送信ノード間および受信ノード間はそれぞれ相互に接続され、分散的に符号化および復号化を

行う。送信側では、各 SCN は当該ノードのみに関連する部分的なチェックシンボルデータ (Check Symbol Data) を作成し、前段の SCN からサブパリティパスを通して送られてきたサブパリティデータ (Sub Parity Data) に加算して、これを SCN→MCN 方向のサブパリティパスを通して次段のノードに転送する。受信側では、各 SDN は当該ノードのみに関連する部分的な Syndrome Data を作成し、前段の SDN からサブパリティパスを通して送られてきた Sub Parity Data に加算して、これを SDN→MDN 方向のサブパリティパスを通して次段のノードに転送する。

各々の SCN あるいは SDN において、自ノードのみに関連する部分的な Check Symbol Data あるいは Syndrome Data を、前段の SCN あるいは SDN からサブパリティパスを通して送られてきた Sub Parity Data に加算して、次段のノードに転送する Sub Parity Data を作成するのは、線形符号を前提としているためである。

MCN では、最終的な Parity Data を作成し、メインパリティパスを通して MDN に転送する。MDN では、最終的な Syndrome Data を作成し、次にその最終的な Syndrome Data に基づいて故障パスのデータを復元する。復元された Recovered Data は、MDN→SDN 方向のサブパリティパスを通してパス故障を検出したノードに転送される。

2.3.3 Codec 設置形態の比較

集中型および分散型いずれの形態でも、MDN で故障パスの復元データを得る際に消失訂正を行うため、各受信ノードはパス故障を検出すると、その故障パス番号 (FPN : Failed Path Number) を補助情報 (Side Information) として MDN に転送する。この Side Information の容量は、SDN から MDN へ転送される Receive Data (集中型のとき) あるいは Syndrome Data (分散型のとき) の容量に比べて十分に少ないので、Side Information の転送による受信側のサブパリティパスの容量増加は、ほとんど無視できる。

Codec への適用符号としては、符号化効率向上のため情報シンボル数より検査シンボル数のほうが少ない符号が望ましい。この条件を考慮すると、Transmit Data あるいは Receive Data の容量よりも Check Symbol Data あるいは Syndrome Data の容量のほうが少なくなる。したがって、分散型のほうが集中型より、サブパリティパスの容量が少なくなる。

集中型では MCN および MDN のみで符号化および復号化を行うが、分散型ではさらに各々の SCN および SDN を含めた全てのノードで符号化および復号化を行う。したがって、符号化および復号化の処理に伴う遅延時間に関しては、分散型のほうが集中型より若干大きくなる。

3. 部分網の構成

3.1 DC 方式に適した網形態

DC 方式においては、送受信ノード間距離が送信ノード間距離および受信ノード間距離に比べて相対的に長いほど、パリティパスの総量 (パスの距離を考慮した延べ容量) が相対的に少なく、本方式の網形態として適する[3]-[4]。しかし、このような条件が満たされない網形態では、パリティパスの総量が増加する。したがって、送受信ノードの配置に制約を設けない一般的な網においては、DC 方式の基本構成のみでは十分な対応ができないことが想定される。本論文では、DC 方式の適用領域を拡大し、送受信ノードの配置に制約のない一般的な常用バス群にも、DC 方式を適用することを目的として、与えられた常用バス群を DC 方式に適する網形態をもつ複数個の部分網に分割する[5]-[8]。

3.2 常用バス群の部分網への分割

3.2.1 網分割のアルゴリズム

網全体の常用バス群のなかから、DC 方式に適した部分網を順次切り出して、各部分網に DC 方式を適用する。DC 方式には不適と判定された残りの部分網には、従来の切替バス事前設定型の SH 方式[2] (以下、単に SH 方式と呼ぶ) を適用する。図 2 に網分割の流れ図を示す。

3.2.2 部分網構成指標

与えられた網全体の常用バス群のなかから部分網の候補となる常用バスの部分集合を選択する。この部分集合に対して、常用バスの総距離を HW 、送信側のサブパリティパスの総距離を HTT 、受信側のサブパリティパスの総距離を HRR 、メインパリティパスの総距離を HTR とする。パスの総距離はパスの延べ距離を意味し、距離は網内のリンクに沿った距離とする。これを用いて、当該部分網に対する部分網構成指標 R を次式により定義する。

$$R = (HTT + HRR + HTR) / (HW + HTT + HRR + HTR) \quad (1)$$

この R の値は、当該部分網全体のパス総距離に対するパリティパス総距離の比率を表す。パリティパスは、DC 方式に固有のパスであり、その比率が少ないほど、当該部分網に対するパス総量の増加が抑制される。従って、上記の R の値により、各部分網への DC 方式の適用可否を判断することができる。本論文では、 R とその基準値 R_0 との大小関係により、当該部分網に対する DC 方式の適用可否を次のように判定する。

$R \leq R_0$ のとき DC 方式を適用する

$R > R_0$ のとき SH 方式を適用する

3.2.3 部分網構成指標基準値の設定法

部分網構成指標 R の基準値 R_0 は、部分網の予備容量率 C を考慮して定める。常用バス総量を CW 、パリティバス総量を CP として、予備容量率 C は次式で定義する。但し、バス総量はパスの距離を考慮した延べ容量 (容量 ×

距離の総計)である。

$$C = CP / (CW + CP) \quad (2)$$

予備容量率 C の値は、他の SH 方式[2]等における値を参照すると 0.5~0.6 程度以下が望ましい。本論文では、シミュレーションにより、 R と C との関係を評価し、その結果に基づいて部分網構成指標基準値 $R0$ の値を設定する。 $R0$ の値の具体的設定については、6.3.2 に述べる。

4. 部分網間での予備バスの共用

4.1 予備バスの共用形態

DC 方式においては、予備容量率の増加を抑制するため、前記したように網全体の常用バス群を複数個の部分網に分割し、各部分網に DC 方式を適用する。本章では、網全体の予備容量率の一層の低減を図るために、図 3 に示すように複数の部分網間でメインパリティバスを部分的に共用する構成を提案する[8]。但し、図 3 は図示の簡単化のため、部分網が 2 つ (DC#1 と DC#2) の場合を示した。メインパリティバスの共用部分は、バス故障がない平常時には各部分網に対してバス経路のみが設定されており、故障発生後に各部分網からの確保要求に基づいて、そのつど必要最小限の容量が確保される。

DC 方式において予備バスを共用する形態では、図 3 に示すように、メインパリティバスは各部分網の専用区間(送信側専用区間および受信側専用区間)と部分網間の共用区間とに分割される。送信側専用区間には、網内の全てのリンクのうちいずれか 1 つが断 (1 重リンク故障) となった際に当該部分網で必要となるパリティバス容量の最大値を設定し、当該部分網の Parity Data を常時流しておく。共用区間の容量としては、網内の全ての 1 重リンク故障に対して、各部分網で必要となるパリティバス容量の合計の最大値を設定する。故障発生時には、パリティバス共用区間の入口において Parity Data のなかからそのつど必要な最小限の部分を切り出して使用する。すなわち、復旧すべき故障モードに対して故障復旧に寄与しない部分を削除するというパンクチャド符号化 (Punctured Coding) を行う。このようにして得られたデータは、パリティバスの共用区間および受信側専用区間を経由して各部分網の MDN に転送される。

4.2 予備バス共用の可否判定

メインパリティバスの部分共用により、共用区間の容量削減が期待される[8]。しかし、一方ではメインパリティバスの共用は、共用区間の経路設定位置によりパリティバスの距離の増加を伴う可能性もある。したがって、パリティバスの距離を考慮して共用の可否を判断することが必要である。

予備バス共用の可否判定を行う際に用いるパリティバス距離の算定モデルを図 4 に示す。但し、図 4 は図示の簡単化のため、部分網が 2 つ (DC#1 と DC#2) の場合を示

した。非共用時のメインパリティバスの総距離を LI 、共用時のメインパリティバスの総距離を LS とする。これらは、共用可否の判定を行う複数の部分網全体について求める。すなわち、図 4 に示すように、 LI は各部分網のメインパリティバス (非共用時) の距離の総計、 LS は各部分網のメインパリティバス (共用時) の専用区間距離合計および共用区間距離の総計である。これらの距離は、全て網内のリンクに沿った距離とする。予備バスの共用可否の判定は下記のとうりとする。

$LS < LI$ のとき 予備バスを共用する

$LS \geq LI$ のとき 予備バスを共用しない

4.3 故障復旧処理手順

故障復旧処理のフローを図 5 に示す。SH 方式では、故障発生後に、複数の常用バス間で共用されている予備バスの容量確保を行い、その後に回復データが送信ノードから転送される (図 5 (a))。

DC 方式では、部分網間で予備バスを共用しなければ、故障回復処理の際には受信側ノード間でのデータ転送のみ行えばよく、予備バス容量の確保手順が不要であるので、迅速な復旧処理が可能である (図 5 (b))。

部分網間で予備バスを共用する形態の DC 方式モデルでは、予備バスの共用区間の容量確保が必要であるが、予備バスの全区間にわたる容量確保を行う必要はない。予備バスのうち各部分網の送信側専用区間には、Parity Data が常時流れており、確保要求が共用区間の開始端ノードに到達した時点で予備バス全体の容量確保が完了する (図 5 (c))。したがって、予備バスの全区間にわたる容量確保を必要とする SH 方式に比較して、高速な復旧が期待できる。

4.4 共用区間の容量確保

4.4.1 容量確保メッセージの転送

予備バスの共用区間は、図 6 に示すように共用を行う複数の部分網間で分離して使用する。共用区間の入口のノードでは、各部分網の送信側専用区間を経由して転送されてきた Parity Data のなかから、それぞれ各部分網ごとに必要な部分を、各部分網ごとに独立に切り出して共用区間の転送データが作成される。また、共用区間の容量としては、4.1 に述べたように網内の全ての 1 重リンク故障に対して、各部分網で必要となる予備容量の合計の最大値が設定されている。この結果、共用区間における各部分網の使用部分の境界は、故障リンクの位置によって変化するが、各部分網の使用部分が重複することはない。したがって、共用区間の容量確保は各部分網ごとに独立に行うことができる。

共用区間の容量確保にかかわる処理メッセージの転送形態の詳細を図 7 に示す。バス故障が発生すると、バス故障を検出した受信ノード (SDN または MDN) は、MDN に向けて故障バス (FP) のバス番号 (FPN : Failed Path Number) を通知し、故障復旧処理を要求する。この FPN

は、2.3.3 に述べたように、受信側のサブパリティパスの補助情報 (Side Information) として転送される。故障復旧要求を受けた MDN は、共用区間の容量確保メッセージ (RM : Request Message) を発出する。RM は受信側専用区間および共用区間を経由して共用区間の開始端ノードに転送され、転送経路上の共用区間の容量のなから、当該部分網の故障パス (FP) の復旧に必要な最小限のメインパリティパスの容量を確保する。

4.4.2 容量確保メッセージの構成

容量確保メッセージ (RM) の主な内容は、下記のとおりである。

(1) 故障部分網番号

故障した部分網の番号を表示する。

(2) 故障パス番号

故障した常用パスの番号を表示する。

(3) 故障パス容量

故障した常用パスの容量を表示する。

(4) 故障マトリクス番号

故障により正常なデータが受信できなくなった時間位置を、符号化マトリクスの番号で表示する。

(5) メインパリティパス受信側専用区間のパス番号

受信側専用区間のパス番号を表示する。

(6) メインパリティパス共用区間のパス番号

共用区間のパス番号を表示する。

(7) 容量確保確認表示

共用区間の容量確保の確認表示である。

これらの (1)~(7) の内容を、容量確保メッセージに搭載して転送する。

5. 比較対象とする網構成

5.1 SH 網

網内の全ての常用パスに対して、切換パス事前設定型の SH 方式[1]を適用する形態である。この SH 方式は、複数の常用パスに対して予備パスを共用する。

5.2 DC 網

網内の常用パス群を部分網に分割し、DC 方式に適すると判定された部分網には DC 方式を適用する。DC 方式に不適と判定された部分網には、それぞれ 100% 予備の DC 方式を適用する。

100% 予備の DC 方式は、常用パス容量と同一容量のパリティパスを設定する構成であり、パス間にまたがる符号化は行わない。従って、この部分に関しては、常用パス間で予備パスの共用を全く行わずに 100% の予備をもつ並列予備方式 (常用パスと並列に、常用パスと同一容量の予備パスを設定する方式) [9] と等価である。

5.3 混在網 (HY 網)

網内の常用パス群を部分網に分割し、DC 方式に適すると判定された部分網には DC 方式を適用する。DC 方式に

不適と判定された部分網には、切換パス事前設定型の SH 方式[2]を適用する。この SH 方式は、複数の常用パスに対して予備パスを共用する。

6. シミュレーション条件

6.1 網形態

本論文では、表 2 に示すように格子網モデルを用いてシミュレーションを行う。網規模は 10×10 、ノード総数は 100、リンク総数は 162 である。隣接ノード間距離は単位距離 (10 km) の 1 ~ 3 倍の範囲でランダム (一様分布) に設定した。

故障モードは 1 重リンク故障と仮定する。Parity Data の作成、Syndrom Data の作成、故障復旧メッセージの処理を行う各ノードにおいて、Check Symbol Data 作成時間、Parity Data 作成時間、Syndrome Data 作成時間、メッセージ処理時間は、全て一定 (2 ms/ノード) と仮定した。

6.2 常用パス及び予備パスの設定

6.2.1 常用パスの設定

本論文では、網全体の常用パスに関して、送信ノード数 n と受信ノード数 m の組み合わせ ($n : m$) を、常用パス形態と呼ぶこととする。シミュレーションにおいては、常用パス形態は $n : m$ (但し、 $n = m$ 、かつ $n = 2 \sim 5$) とし、常用パス容量は基準容量 C_0 の 1 ~ 10 倍の範囲でランダム (一様分布) に設定した (表 2)。

各常用パスの経路は、6.1 に述べた網形態において送受信ノード間に最短距離となる経路で設定する。最短経路設定のアルゴリズムは、Dijkstra 法を用いた。常用パス経路相互の間は、その経路上に同一のリンクを共用することは許容する。但し、リンク共用とは異なるパスが同一のリンクに収容されることを意味する。

6.2.2 予備パスの設定

1 重リンク故障時に、故障パスの全てを 100% 復旧できるという条件 (以下、100% 復旧条件と略記する) を満たす予備パス経路とリンクの予備容量を設定する。予備パスの経路設定およびリンクの予備容量設定は、6.2.1 に述べた常用パスの設定を行った後に、下記に述べるようにして行う。

(1) SH 網における予備パスの設定

各常用パスの送受信ノード間に、常用パスと同一容量の予備パスを最短経路で設定する。SH 網におけるリンク共用条件を表 3 に示す。

同一のパスに関する常用パス経路と予備パス経路とは、同一リンクを共用しないが同一ノードを経由することは許容する。異なるパスの間に関しては、常用パス経路と予備パス経路とは、100% 復旧条件を満たす限り、同一リンクの共用を許容する。異なるパスの間に関する予備パス経路相互についても、100% 復旧条件を満たす限り、同一リン

クの共用を許容する。

リンクの予備容量は、上に述べたようにして予備パスの経路設定を行った後に、100%復旧条件を満たした上で必要となる最小の容量を、それぞれのリンクについて算定し、その容量を設定する。

(2) DC 網における予備パスの設定

DC 方式に適すると判定された各部分網に対して、それぞれ必要とするパリティパスの経路とリンク容量を設定する。DC 網におけるリンク共用条件を表4に示す。

同一部分網内では、常用パス経路とパリティパス経路とは同一リンクを共用しない。パリティパス経路相互の間については、100%復旧条件を満たす限り、同一リンクの共用を許容する。なお、部分網内のメインパリティパスは一括して同一の経路に設定する。

異なる部分網の間に関しては、パリティパス経路相互の間については、100%復旧条件を満たせば、同一リンクの共用を許容する。但し、メインパリティパス経路相互の間は、4.2 に述べた予備パス共用の可否判定の結果、共用可と判定された場合に限りリンクを共用する。常用パス経路とパリティパス経路との間についても、100%復旧条件を満たせば、同一リンクの共用を許容する。但し、4.2 に述べた予備パス共用の可否判定の結果、メインパリティパスの共用が可と判定された場合には、メインパリティパス経路の共用区間とそれに関わる常用パス経路との間は、同一リンクを共用しない。また、常用パス経路同志がリンク共用しているときは、これらの常用パス経路とそれに関わるパリティパス経路との間は、リンク共用しない。

リンクの予備容量は、上に述べたようにして予備パスの経路設定を行った後に、100%復旧条件を満たした上で必要となる最小の容量を、それぞれのリンクについて算定し、その容量を設定する。

DC 方式に不適と判定された残りの部分網に関しては、5.2 に述べたように、100%予備をもつ並列予備方式とする。これらの（DC 方式に不適と判定された）部分網については、常用パス経路と予備パス経路とのリンク共用は許容しない。予備パス経路同志のリンク共用は許容するが、予備パス容量の削減は行わない。すなわち、これらの（DC 方式に不適と判定された）部分網に関しては、常用パス容量と同一の予備パス容量が、予備パス経路上の各リンクに設定される。

(3) HY 網における予備パスの設定

HY 網においては、次のようにして予備パスを設定する。

まず、DC 方式に適すると判定された各部分網に関しては、前記した(2)の DC 網と同様の予備パスの設定を行う。

次に、DC 方式に不適と判定された残りの部分網に関しては、5.3 に述べたように、複数の常用パスに対する予備パスを共用する SH 方式を適用する。すなわち、これらの（DC 方式に不適と判定された）部分網に関しては、前

記した(1)の SH 網と同様にして予備パスの設定を行う。

6.3.2 部分網構成指標基準値 R_0 の設定

6.1 に述べた網形態を前提として、部分網構成指標 R と平均復旧時間（故障パスの復旧時間の平均値）との関係のシミュレーション結果を図8に示し、部分網構成指標 R と予備容量率との関係のシミュレーション結果を図9に示す。但し、Codec の設置形態は集中型、常用パス形態は $(n:m) = (4:4)$ と仮定した。シミュレーションの試行回数は100回とし、各試行ごとの測定データの平均値により評価した。

予備容量率の値は、他の事前設定型の SH 方式[2]等における値を参照すると、0.5 ~ 0.6 程度以下が妥当と考えられる。図9により、予備容量率が0.6程度以下となる部分網構成指標 R の値を求めると $R = 0.35$ 程度となる。また、図8を参照すると、この値 ($R = 0.35$) 以下の範囲では、DC 網および HY 網ともに故障復旧時間の増加は僅かであり、SH 網に比較して故障復旧時間の低減が可能である。従って、本論文では、以下において部分網構成指標の基準値 R_0 の値を $R_0 = 0.35$ に設定して、シミュレーションによる性能評価を行う。

7. 性能評価

本章では、表2に示したシミュレーション条件に従って、各種の常用パス形態に対する SH 網、DC 網、HY 網の性能をシミュレーションにより評価する[10]。シミュレーションの各試行ごとに、格子網の隣接ノード間距離を規定された範囲内でランダムに設定する。また、シミュレーションの各試行ごとに、送受信ノード位置を格子網上の全ノードからランダムに選択し、選択された送受信ノード間で常用パスをフルメッシュに設定する。各常用パスの容量は、指定された容量の範囲内でランダムに設定する。シミュレーションの試行回数は、100回とし、各試行ごとの測定データの平均値により評価した。

7.1 評価項目

評価項目は、下記のとおりである。

(1) 平均復旧時間 T

各々の故障パスの復旧時間を、受信端ノードでパス故障を検出した時点から回復データがその受信端ノードに転送されるまでの時間とする。平均復旧時間 T は、各故障パスの復旧時間の平均値である。平均復旧時間 T の算出方法は付録1.に示す。

(2) 予備容量率 C

予備容量率 C は、網内のパス総量（常用パス総量+予備パス総量）に対する予備パス総量の比率である（式(2)）。但し、パス総量はパスの距離を考慮した延べ容量である。

(3) メッセージ総量 M

メッセージ総量 M は、（故障復旧処理メッセージの数×故障復旧処理メッセージの転送距離）の総計である。但

し、転送距離は単位距離 (10 km) で規格化する。メッセージ総量 M の算出方法は付録 2. に示す。

7.2 平均復旧時間の評価

図 10 および図 11 に、各種の常用バス形態に対する平均復旧時間 T のシミュレーション結果を示す。DC 網では、Codec 設置形態を集中型にすると分散型よりも平均復旧時間が短縮される (10 % ~ 30 % 程度の短縮)。DC 網と SH 網を比較すれば、集中型および分散型いずれにおいても、DC 網は SH 網に比べて平均復旧時間を大幅に短縮できる (30 % ~ 70 % 程度の短縮)。HY 網は DC 網と SH 網の中間の性能をもち、SH 網と比較すれば、やはり平均復旧時間を短縮できる (10 % ~ 20 % 程度の短縮)。

7.3 予備容量率の評価

図 12 および図 13 に、各種の常用バス形態に対する予備容量率 C のシミュレーション結果を示す。DC 網では、Codec 設置形態を分散型にすると集中型よりも予備容量率が若干減少する (10 % 程度の減少)。DC 網と SH 網を比較すれば、集中型および分散型いずれにおいても、DC 網は SH 網に比べて予備容量率が増加する (10 % ~ 30 % 程度の増加)。HY 網は DC 網と SH 網の中間の性能をもち、DC 網に比べて予備容量率を低減できる (5 % ~ 10 % 程度の低減) ので、SH 網と比較した際の予備容量率の増加を若干抑制できる。

7.4 メッセージ総量の評価

図 14 に各種の常用バス形態に対するメッセージ総量 M のシミュレーション結果を示す。DC 網における故障復旧処理メッセージは、4.4 に述べたメインパリティバス共用区間の容量確保メッセージ (RM) である。この RM の数は、故障した常用バスの数で定まり、Codec 設置形態には依存しない。また、RM が転送されるメインパリティバスの経路は、Codec 設置形態には依存しないので、RM の転送距離も Codec 設置形態には依存しない。従って、メッセージ総量も Codec 設置形態に依存しない。DC 網は SH 網に比較して、メッセージ総量を大幅に削減できる (80 % ~ 90 % 程度の削減)。HY 網は DC 網と SH 網の中間の性能をもち、SH 網に比べれば、やはりメッセージ総量を削減できる (10 % ~ 30 % 程度の削減)。

8. むすび

複数のバスの間にまたがる誤り訂正符号化を用いて、バス故障復旧処理の簡易化ならびにバス故障の迅速な復旧を行う DC 方式について、網形態および予備容量の削減法を示すとともに、格子網モデルにおけるシミュレーションを行って故障復旧性能を評価した。得られた主な結果を以下にまとめる。

(1) DC 方式の基本構成を示し、方式の基本的特徴、適用符号、基本的な復旧処理手順などを明かにした。DC 方

式において故障バスのデータ復元に用いる適用符号は、線形ブロック符号であり、符号構成ならびに符号化・復号化の処理は容易である。また、復号化の際に消失訂正を用いるので、適用符号の訂正能力を最大限に活用できる。故障復旧にかかわる処理は受信側のノードの間でのみ行われ、送受信ノード間での処理メッセージの転送を必要としないので迅速な故障復旧が可能である。

(2) DC 方式の適用領域の拡大を図るため、常用バス群を DC 方式に適する複数の部分網に分割する構成を提案し、その分割アルゴリズムを示した。これにより、送受信ノードの配置に制約のない一般的なトポロジーの常用バス群に対して DC 方式を適用することが可能になる。

(3) 予備容量の低減を図るため、部分網の間で予備バスの部分共用を行う構成を提案し、故障復旧処理手順および故障復旧処理メッセージの構成を示した。

(4) シミュレーションの結果、DC 網は SH 網に比較して予備容量は若干増加するが、平均復旧時間を大幅に短縮でき、さらに故障復旧処理メッセージ総量を大幅に削減できることを明かにした。

(5) DC 方式と SH 方式を共存させる HY 網は、DC 網と SH 網との中間の性能を示す。シミュレーションの結果、HY 網は DC 網に比較して予備容量の増加を抑制でき、また SH 網に比較して平均復旧時間の短縮ならびに故障復旧処理メッセージ総量の削減ができることを明かにした。

文献

- [1] W. D. Grover, "The Selfhealing Network," Proc. IEEE GLOBECOM'87, pp. 1090-1095, Nov. 1987.
- [2] 川村龍太郎, 葉玉寿弥, 佐藤健一, "バーチャルバス概念に基づく ATM 網セルフヒーリング方式," 信学論 (B-I), vol. J74-B-I, no. 7, pp. 537-546, July 1991.
- [3] E. Ayanoglu, Chin-lin I., R. D. Gitlin, and J. E. Mazo, "Diversity Coding for Transparent Self-Healing and Fault-Tolerant Communication Networks," IEEE Trans. Commun., vol. 41, no. 11, pp. 1677-1685, Nov. 1993.
- [4] 北見徳廣, "ダイバーシティコーディングによる ATM 網バス故障復旧方式の基本構成," 信学論 B-I, vol. J80-B-I, no. 10, pp. 742-751, Oct. 1997.
- [5] 小沼 武, 北見徳廣, "ダイバーシティコーディングによる ATM 網のバス故障復旧方式," 信学技報, CS95-3, April 1995.
- [6] 高田和雄, 北見徳廣, "ダイバーシティコーディングにおける予備バス共用の評価," 信学技報, CS95-116, March 1996.
- [7] 高田和雄, 北見徳廣, "ダイバーシティコーディング網に適した網構成とその評価," 信学技報, CS96-168, March 1997.

- [8] 北見徳廣, "ダイバーシチコーディングによるバス故障復旧方式の網形態と予備容量削減方法," 信学論 B, vol. J82-B, no. 8, pp. 1489-1501, Aug. 1999.
- [9] 川村龍太郎, "ATM 網における無中断バーチャルバス構成法," 信学技報, CS94-196, Jan. 1995.
- [10] 内山基宏, 北見徳廣, "ダイバーシチコーディングによるバス故障復旧方式の性能評価," 信学技報, CS99-181, March 2000.

付録

1. 平均復旧時間の算出

1.1 SH 方式の平均復旧時間

図 5(a) を参照すると, SH 方式の復旧時間は, 予備バスの容量確保メッセージの転送時間と回復データの転送時間との和である。但し, 転送時間はいずれも, 転送リンク上の伝搬時間と通過ノードにおける処理時間とを含む。容量確保メッセージの転送時間の平均値を TR 、回復データの転送時間の平均値を TD とすると, 平均復旧時間 T は次式で与えられる。

$$T = TR + TD \quad (A1)$$

但し, TR , TD を求める際の平均化の操作は, 全ての 1 重リンク故障およびその 1 重リンク故障により切断される故障となるバス (故障バス) の全てについての平均をとる。

1.2 DC 方式の平均復旧時間

DC 方式の平均復旧時間は, 各部分網ごとにパリティバス共用の有無によって異なり, それぞれ 1.2.1 および 1.2.2 のようになる。シミュレーションにおける平均復旧時間の評価は, 各部分網ごとにパリティバス共用の有無を考慮して, それぞれの場合の復旧時間を算定し, さらに全ての 1 重リンク故障およびその 1 重リンク故障により切断される故障バスの全てについての平均をとることによって求める。

1.2.1 パリティバス非共用型の DC 方式

図 5(b) を参照すると, パリティバス非共用型の DC 方式の復旧時間は, 故障バス番号通知情報の転送時間, Decoder 入力バス間の遅延差調整時間, Decoder における復号時間, 復元データの転送時間の和である。但し, 転送時間はいずれも, 転送リンク上の伝搬時間と通過ノードにおける処理時間とを含む。故障バス番号通知情報の転送時間の平均値を TF 、Decoder 入力バス間の遅延差調整時間の平均値を TA 、Decoder における復号時間の平均値を TC 、復元データの転送時間の平均値を TD とすると, 平均復旧時間 T は次式で与えられる。

$$T = TF + TA + TC + TD \quad (A2)$$

但し, TF , TA , TC , TD を求める際の平均化の操作は, 部分網内の故障バスの全てについての平均をとる。

1.2.2 パリティバス共用型の DC 方式

図 5(c) を参照すると, パリティバス共用型の DC 方式の復旧時間は, 故障バス番号通知情報の転送時間, 共用区

間容量確保メッセージの転送時間, 故障復旧用パリティデータの転送時間, Decoder 入力バス間の遅延差調整時間, Decoder における復号時間, 復元データの転送時間の和である。但し, 転送時間はいずれも, 転送リンク上の伝搬時間と通過ノードにおける処理時間とを含む。故障バス番号通知情報の転送時間の平均値を TF 、共用区間容量確保メッセージの転送時間の平均値を TR 、故障復旧用パリティデータの転送時間の平均値を TP 、Decoder 入力バス間の遅延差調整時間の平均値を TA 、Decoder における復号時間の平均値を TC 、復元データの転送時間の平均値を TD とすると, 平均復旧時間 T は次式で与えられる。

$$T = TF + TR + TP + TA + TC + TD \quad (A3)$$

但し, TF , TR , TP , TA , TC , TD を求める際の平均化の操作は, 部分網内の故障バスの全てについての平均をとる。

2. メッセージ総量の算出

SH 方式および DC 方式ともに, 故障復旧処理メッセージは容量確保メッセージである。容量確保メッセージは, SH 方式においては予備バスの容量確保に用いられ, DC 方式においてはパリティバス共用区間の容量確保に用いられる。SH 方式およびパリティバス共用型の DC 方式においては, 1 本の故障バスに対して 1 つの容量確保メッセージが転送される。パリティバス非共用型の DC 方式においては, 容量確保メッセージは不要である。

1 つの 1 重リンク故障 f に対して, その 1 重リンク故障 f により切断される故障バスの本数を N_f 本, この N_f 本の故障バスの内の k 番目 ($1 \leq k \leq N_f$) の故障バス $FPfk$ に関する容量確保メッセージの転送距離を Lfk とする。但し, 故障バス $FPfk$ がパリティバス非共用型の DC 方式により復旧される場合には, 容量確保メッセージは不要であるので, その転送距離 Lfk は 0 とする。

1 重リンク故障 f に対するメッセージ総量 Mf は, Lfk ($1 \leq k \leq N_f$) の和である。すなわち,

$$Mf = \sum_{k=1}^{N_f} Lfk \quad (A4)$$

メッセージ総量 M は, Mf の値を全ての 1 重リンク故障 f について平均化して求める。すなわち,

$$M = Ef [Mf] \quad (A5)$$

ここで, $Ef [x]$ は, x を f について平均化することを意味する。

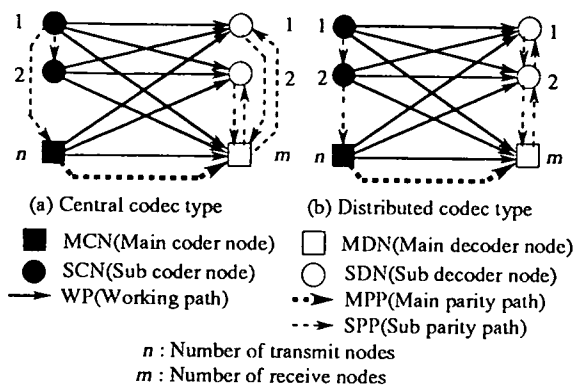


図1 DC方式の基本構成

表1 パリティパス関連の転送データ

(a) Central codec type		
Transmit Side	SCN→MCN	Transmit data of each SCN
	MCN→MDN	Parity data
Receive Side	SDN→MDN	Receive data of each SCN
	MDN→SDN	Failed path number
		Recovered data of failed path

(b) Distributed codec type		
Transmit Side	SCN→MCN	Sub parity data based on check symbol data
	MCN→MDN	Parity data
Receive Side	SDN→MDN	Sub parity data based on syndrome data
	MDN→SDN	Failed path number
		Recovered data of failed path

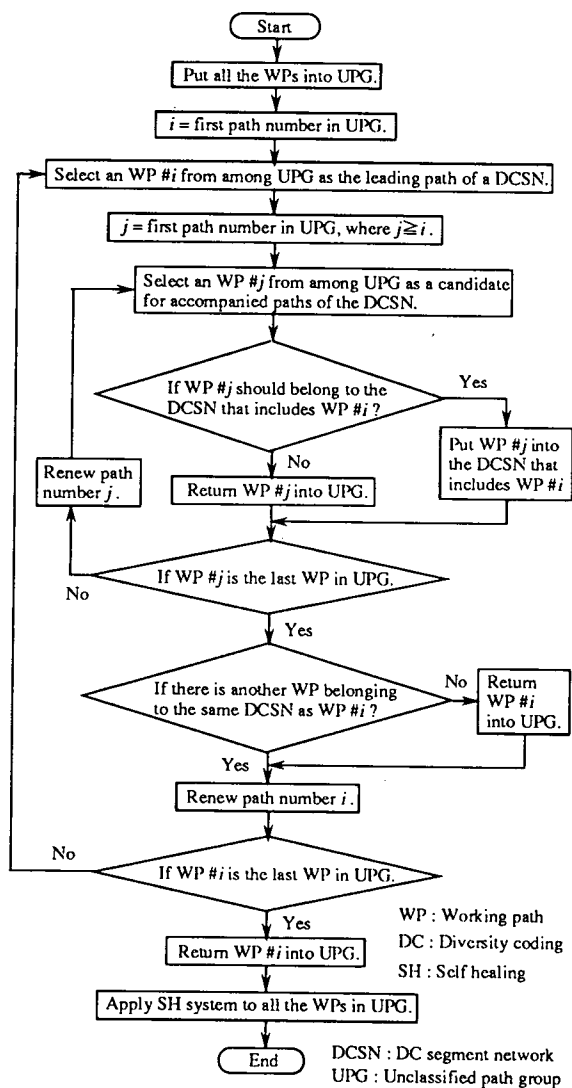
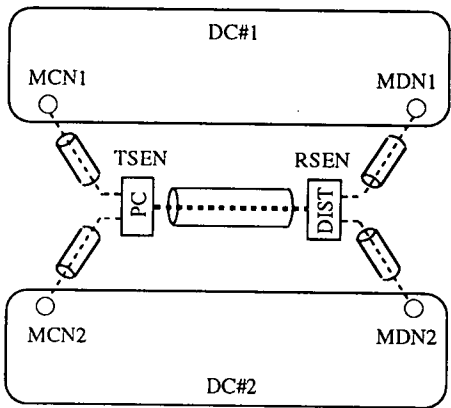


図2 部分網分割の流れ図



DC#i: DC segment network #i
MCNi: Main coder node in DC#i
MDNi: Main decoder node in DC#i
TSEN: Transmit side edge node of shared spare path
RSEN: Receive side edge node of shared spare path
PC: Punctured coding
DIST: Distributor
-----: Dedicated part parity path
.....: Common part parity path

図3 DC方式における予備パスの共用（部分網数2）

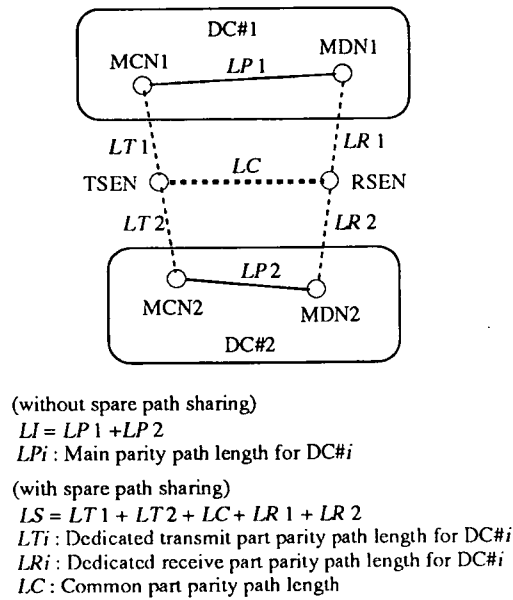
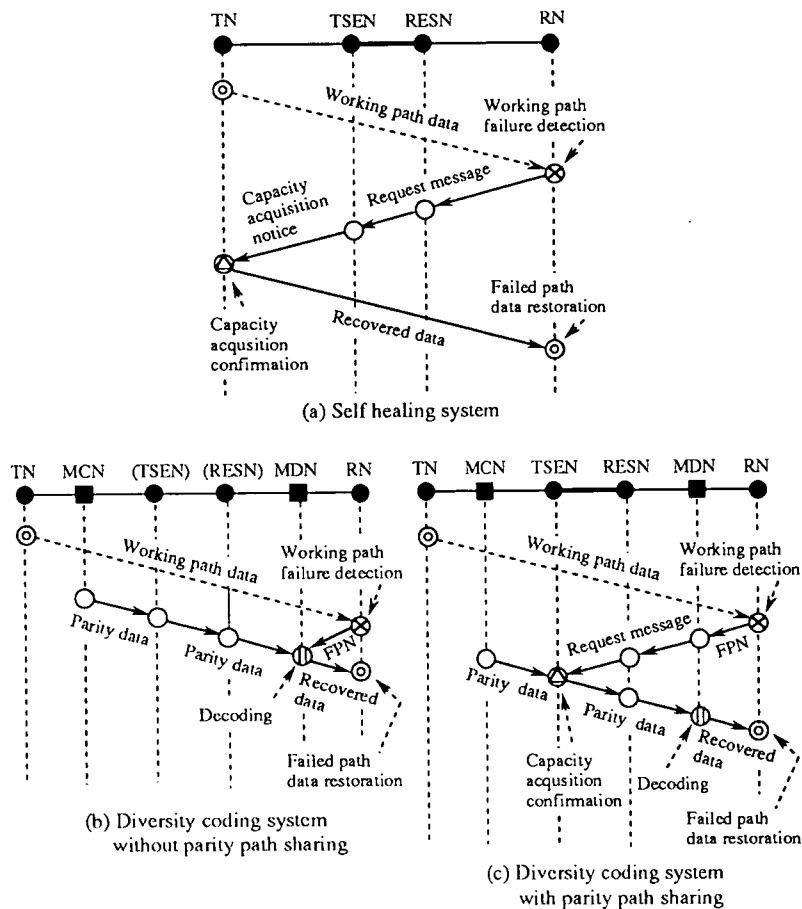


図4 予備バス共用の可否判定における距離の算定
(部分網数2)

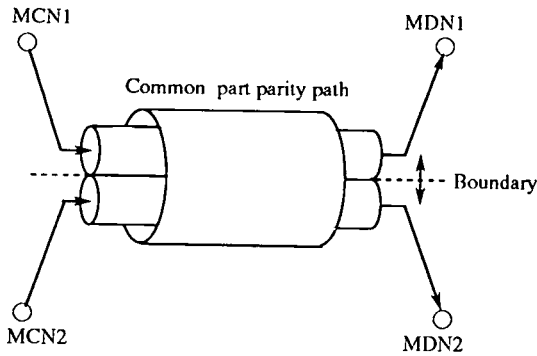


TN : Transmit node MCN : Main coder node
 RN : Receive node MDN : Main decoder node
 TSEN : Transmit side edge node of shared spare path
 RSEN : Receive side edge node of shared spare path
 FPN : Failed path number
 — : Dedicated section of spare path
 — : Shared section of spare path

図5 故障復旧処理手順

表 2 シミュレーション条件

Network topology	10×10 lattice network
Number of nodes	100
Number of links	162
Link length	1～3 times of unit length 10 km (uniform distribution)
Working path topology	$n : m$ ($n = m$, $n = 2 \sim 5$)
Position of working VP terminating nodes	Full mesh for each working path terminating nodes
Working VP capacity	1～10 times of unit capacity (uniform distribution)
Bit rate of physical link	155.52 Mb/s
Message processing time	2 ms / node
Check symbol data construction time	2 ms / node
Parity data construction time	2 ms / node
Syndrom data construction time	2 ms / node
Failure mode	Single link failure
Spare path route and spare capacity of link	Route and capacity for 100% recovery in case of single link failure



Note : Boundary of common part capacity can be changed referring requested capacity for each segment network.

図 6 予備バス共用区間の使用形態 (部分網数 2)

VP : Virtual path

Note : Working path topology means combination of transmit and receive nodes for working paths.

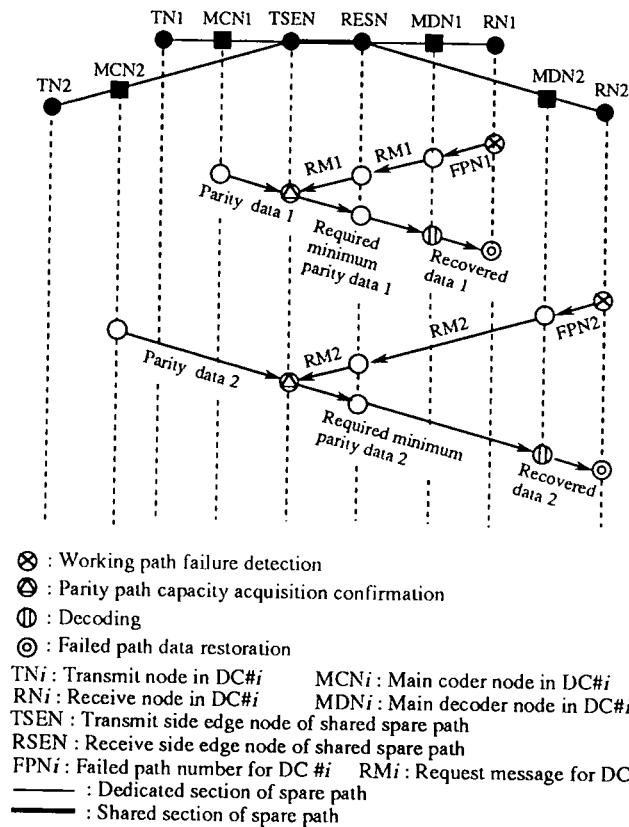


図 7 予備バス共用モデルにおける故障復旧メッセージ転送形態の詳細 (部分網数 2)

表 3 SH網におけるリンク共用条件

	Working path	Spare path
Working path	◎	△
Spare path	△	○

- ◎ : Unconditionally sharable
○ : Weak-conditionally sharable (if 100% recovery condition is satisfied).
△ : Strong-conditionally sharable
working / spare for the same VP : unsharable
working / spare for different VPs : sharable (if 100% recovery condition is satisfied).

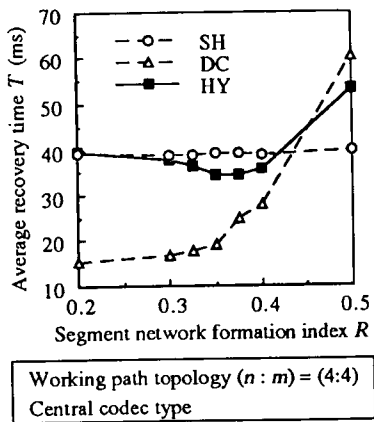


図 8 部分網構成指標と平均復旧時間の関係

表 4 DC網におけるリンク共用条件

(a) Within the same segment network

			Working path	Parity path		
				Main parity path		Sub parity path
				Dedicated section	Shared section	
Working path			⊙	×	×	
Parity path	Main parity path	Dedicated section	×	—	○	
		Shared section				
		Sub parity path		×	○	○

- ◎ : Unconditionally sharable
○ : Weak-conditionally sharable (if 100% recovery condition is satisfied)
× : Unsharable
— : Out of consideration (main parity path uses only one route in each segment network)

(b) Between separated segment networks

			Working path	Parity path		
				Main parity path		Sub parity path
				Dedicated section	Shared section	
Working path			◎	△2	△1	△2
Parity path	Main parity path	Dedicated section	△2	○	○	○
		Shared section	△1	○	○*	○
	Sub parity path		△2	○	○	○

- ◎ : Unconditionally sharable
○ : Weak-conditionally sharable (if 100% recovery condition is satisfied)
△1 : Strong-conditionally sharable
shared section of main parity path / related working paths : unsharable
otherwise : sharable (if 100% recovery condition is satisfied)
△2 : Strong-conditionally sharable
working / parity for the VPs that share the same link : unsharable
otherwise : sharable (if 100% recovery condition is satisfied)
* : Only if the main parity path can be sharable

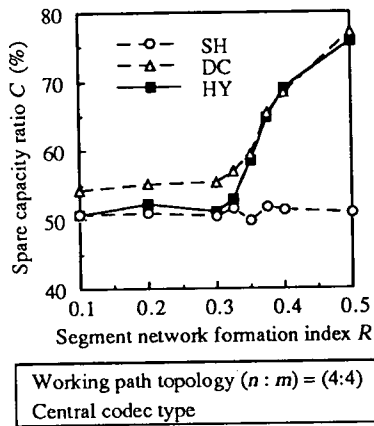


図 9 部分網構成指標と予備容量率の関係

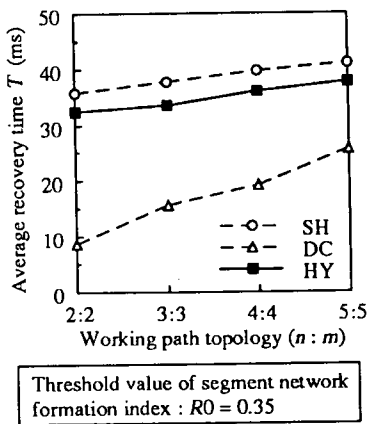


図 10 平均復旧時間の評価 (集中型 codec)

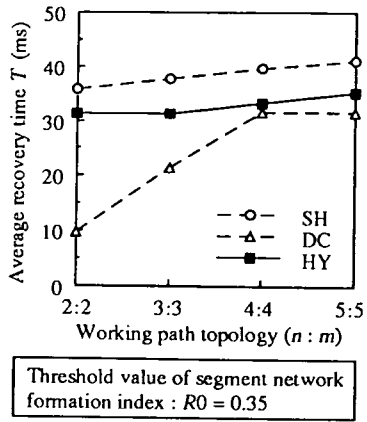


図 11 平均復旧時間の評価 (分散型 codec)

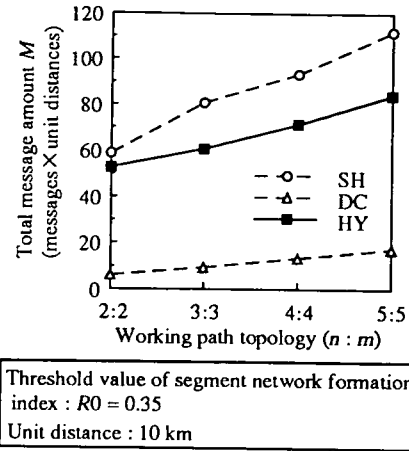


図 14 メッセージ総量の評価

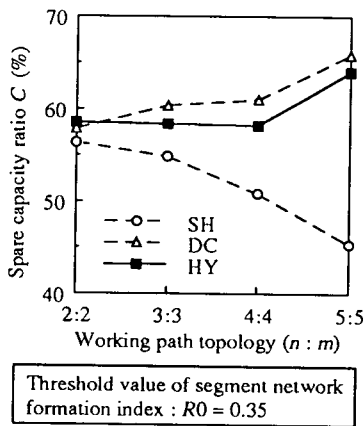


図 12 予備容量率の評価 (集中型 codec)

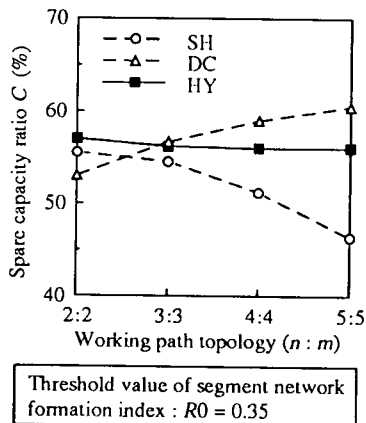


図 13 予備容量率の評価 (分散型 codec)